

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В ТИТАНЕ ВТ-01 ВИХРЕВЫМИ ТОКАМИ

Чжу Ибо, Сюй Шупэн, В.В. Ларионов

Научный руководитель: профессор, В.В. Ларионов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [lvv@tpu.ru](mailto:lvv@tpu.ru)

## STUDY OF HYDROGEN DIFFUSION IN TITANIUM BT-01 EDDY CURRENTS

Yibo Zhu, Shupeng Xu, V.V. Larionov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. V.V. Larionov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [lvv@tpu.ru](mailto:lvv@tpu.ru)

**Abstract.** A common method for determining the hydrogen diffusion coefficient  $D$  is a research of the kinetics of penetration it through metallic membrane. However, in some cases, this method cannot be investigated carbide forming materials relates to titanium. In addition, measurements are limited by temperature interval. Other methods (NMR, quasi-elastic neutron scattering effects, Mossbauer and Gorsy) are complex instruments. The measurement results are essentially dependent on the concentration gradient of hydrogen implanted, the hydrogenation process and the form of the test samples. In this paper, we propose a method of eddy current measurement of diffusion coefficients using classical Fick equation. The sample of titanium hydrogenation at 600 °C and a pressure of 0.66 atm. The diffusion of hydrogen flow in the initial part of the sample analyzed by moving sensor along the length of the sample. The measurement process carried out periodically every 60 minutes. The measured values of the eddy current (active and reactive components) are presented in matrix form as values  $A_{11}$ ,  $A_{12} \dots A_{kn}$  at a certain frequency  $f$ . To increase the accuracy of measurements as a matrix element used the  $\text{tg}\delta$ . This value depends on the eddy current frequency  $f$ , material electric conductivity  $\sigma$ . In turn, the electrical conductivity  $\sigma$ , the thickness of the sample  $\eta$ , and frequency  $f$  connected by the relation  $\eta = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2}$ . By treating each such matrix, obtain the values of the diffusion

coefficient  $D_{xy}$  in every layer of the sample. These values may change over time, the penetration of hydrogen upon slice from layer to layer. The measured values of the diffusion coefficients are  $D = 2 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

**Введение** Распространенным методом определения коэффициента диффузии водорода  $D$  является исследование кинетики проникания его через металлические мембраны [1, 2]. Однако в ряде случаев этим способом невозможно исследовать гидридообразующие материалы [3], к которым относится титан. Кроме того, измерения ограничены температурным интервалом. Другие методы (ЯМР, квазиупругое рассеяние нейтронов, эффекты Мессбауера и Горского) отличаются сложностью аппаратуры, а получаемые результаты существенно зависят от градиента концентрации внедренного водорода, способа наводороживания и формы исследуемых образцов [1]. Известен способ определения коэффициента диффузии по изменению момента сил тяжести наводороженного стержня при движении в нем водорода. Для этого в насыщенных образцах равновесное распределение водорода. Определяют временную

зависимость моментов сил тяжести, возникающих при релаксации распределения водорода к равновесному [4]. Измеренный таким способом коэффициент диффузии водорода в железе равен  $D=1.4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ . Методика измерения этого параметра по скорости изменения электросопротивления при дегазации наводороженных образцов лишена перечисленных выше недостатков, отличается простотой и позволяет определять коэффициент  $D$  при любом способе наводороживания в широком интервале температур. Полное сопротивление наводороженного металла [5] равно  $\rho = \rho(T) + \rho(H)$  (1), где  $\rho(T)$  — сопротивление чистого металла при температуре  $T$ ;  $\rho(H)$  — изменение электросопротивления, определяемое рассеянием носителей тока на внедренных атомах водорода. При этом  $\rho(H) = K_H C_H$ , (2) где  $C_H$  — концентрация внедренного водорода,  $K_H$  — константа пропорциональности, равная, например, для переходных металлов V группы 60–80 мкОм-м/ат. % Н [6]. Методики определения параметра  $D$  по изменению давления водорода в рабочей камере при дегазации образцов рассмотрены в [7] и по изменению электросопротивления при введении примеси внедрения [8]. В [9] применен подход, основывающийся на решении второго уравнения Фика для цилиндрических образцов [10].

**Экспериментальные результаты.** В таблице  $A_{11}, A_{12} \dots A_{kn}$  — элементы значений вихревого тока на определенной частоте. Обработывая каждую такую матрицу, получаем значения коэффициента диффузии  $Dx$  в каждом отдельном слое. Данные значения могут изменяться с течением времени при послойном проникновении водорода из слоя в слой. Это фиксируется набором матриц вида табл. 1. Число таких матриц зависит от используемого количества частот вихревого тока. Величина коэффициентов  $Dx$  зависит от свойств материала, степени наводороженности, распределения дефектов в металле и их характере.

Таблица 1

Пример матрицы измерений вихревых токов по координате образца во времени и на определенной частоте

$t, \text{ min}$ $X, \text{ cm}$	20	40	60	80
1	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{14}$
2	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$	$A_{24}$
3	$A_{31}$	$A_{32}$	$A_{33}$	$A_{34}$
4	$A_{41}$	$A_{42}$	$A_{43}$	$A_{44}$


1		S	2	3	4	5	6	7	k
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Рис. 1. Форма образца для исследования диффузии водорода (1 — область наводороженности, 2, 3 ... — области расположения вихревого датчика, S — вихревой датчик)

Погрешность определения значения  $Dx$  зависит, в основном, от скорости передвижения вихревого датчика вдоль образца  $\Delta x/\Delta t$ .

**Методика измерений.** Величина  $\Delta x$  определяется размерами вихревого датчика. В нашем случае этот шаг равен 6 мм. Параметр  $\Delta t$  определяется эмпирически по зависимости  $U_{Re}, U_{Im}$  от времени. С этой целью вихревой датчик устанавливается в координате  $X_1$  в ненаводороженной части образца и

записывается в автоматическом режиме значения токов и тангенса угла диэлектрических потерь во времени. Тем самым определяем промежуток времени, при котором производная  $\delta I / \delta t \neq 0$ .

При  $D = \text{const}$  и  $C = K_H U$  (3) уравнение диффузии имеет вид:  $\frac{\partial U}{\partial t} = D \nabla^2 U$  (4)

Связь между концентрацией водорода в титане и напряжением на вихретоковом датчике (уравнение 3) определяется эмпирически. По предложенной методике вычислили коэффициент диффузии для следующих параметров наводороженного образца:  $L = 200 \text{ mm}$ ,  $h = 2 \text{ mm}$ ,  $C_H = 0.26 \% \text{ wt}$ ,  $D = 2 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Это значение соответствует литературным данным.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта № 1524, тема 0.1325. 2014.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Взаимодействие водорода с металлами // Под ред. А.П. Захарова. М.: Наука, 1987. – 296 с.
2. Грабовецкая Г.П., Никитенков Н.Н., Мишин И.П., Душкин И.В., Степанова Е.Н., Сыпченко В.С. Диффузия водорода в субкристаллическом титане // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 322. – №2. – С. 55–59.
3. Пайсл Г. Деформации решетки металла, связанные с водородом. – В кн.: Водород в металлах. М.: Мир, Т. 1, 1981. – С. 69–93.
4. Пат. 1636729 SU. МПК8 G01N15/08 29/04. Способ определения коэффициента диффузии водорода в металлах / А.Г. Баланюк, А.В. Тарасенко, А.А. Савченко, Ю.Н. Ягодзинский. Заявлено 10.04.1990; Оpubл. 10.02.1991, Бюл. № 11. – С.22.
5. Ивашина Ю. К., Немченко В. Ф., Смолин М. Д. и др. Физические свойства системы Та–Н. – ЖФХ. – 1980. – №11. – С. 2861–2864.
6. Veratu M. Verdini L. Electrical resistance measurements on hydrogen-charged tantalum and niobium. – Phys. Stat. Solidi. – 1965. 9 (243–250).
7. Катлинский В. М., Егорова В. М. Диффузия водорода в наводороженном тантале. – ЖФХ, 1980. – № 3. – С. 757–759.
8. Шульгин Е. И., Баталов В. С, Кочетков В. П. Определение коэффициента диффузии газа в металле по кинетике изменения электросопротивления. – В кн.: Металлофизика. Киев: КПИ, 1971. – Вып. 37. – С. 60–62.
9. Микитишян С.И., Федоров В.В., Сергиенко О.М., Соколовский О.Р., Спас Я.М. Определение коэффициента диффузии в металлах по скорости изменения сопротивления при десорбции. – ФХММ. – 1985. – Т.21. – №1. С. 24–26
10. Бэррер Р. Диффузия в твердых телах. – М.: ГИИЛ, 1948. – 504 с.